



TITLE:

圧縮性流体と固体の熱連成を考慮した多相場解析手法に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

鳥生, 大祐

CITATION:

鳥生, 大祐. 圧縮性流体と固体の熱連成を考慮した多相場解析手法に関する研究. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19279>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2016-09-23に公開; 許諾条件により要旨は2015-12-24に公開; 許諾条件により本文は2018-08-01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	鳥 生 大 祐
論文題目	圧縮性流体と固体の熱連成を考慮した多相場解析手法に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本研究では，最初に圧縮性流体の数値解析手法について，質量の保存性を精度良く満足するとともに，低マッハ数圧縮性流れに対して，音速に基づくクーラン数を従来の解法より大きく設定できる効率的な計算手法を提案した．次に，この解法を発展させて，圧縮性流体と固体間の熱連成を扱うことができる多相場解析手法を構築している．これらの解法の有効性を確認するため，数値計算結果を理論解および既往の実験結果と比較し，妥当な結果が得られることを示した．また，数値実験として，実用的かつ固体形状や計算条件が複雑な問題を設定し，これに対して本数値解析手法が適用可能であることを確認している．本論文は，以下の4章から構成されている．</p> <p>第1章は序論であり，本研究の背景と目的，また関連する既往研究の調査結果などが記述されている．その結果，圧縮性流体と固体の熱連成現象に対する数値解析手法を構築することは，工学分野における重要な研究課題の1つであることを示し，本研究の位置づけを明らかにした．熱伝導性を有し，また場合によっては発熱する固体と，その周囲に圧縮性流体が共存する工学的な問題では，両者の熱連成過程を数値解法で適切に考慮する必要がある，さらに実用的な問題においては複雑な形状の固体境界面を扱う計算手法が必要である．このために，従来提案されている非圧縮性流体と固体の多相場連成計算法を発展させて，圧縮性流体と固体との多相場解法を提案することが有効であるという方向性を示した．</p> <p>第2章では，圧縮性流体と固体から構成される多相場の基礎方程式とそれらの計算アルゴリズムを考察している．本研究では，圧縮性流体の基礎方程式から，一流体モデルと同様の考え方に基づいて固気多相場の基礎方程式を導出し，コントロールボリューム内に占める各相の体積あるいは質量の割合に基づいて平均化された基礎方程式を導いた．このように，圧縮性流体と固体が共存する場を1つの混合流体として扱うため，固体と流体の境界面における境界条件の設定が不要となり，数値計算を行う際には簡単な構造格子を利用することが可能である．</p> <p>圧縮性流体解法としては，既往の TCUP 法に独自の改良を加えた新たな解法を提案している．TCUP 法では，非保存形表示の基礎方程式を解き，その結果を用いて状態方程式から密度を更新するため，質量が必ずしも保存されないという問題点がある．これに対して，本研究で提案された数値解法では，保存形表示された質量保存則を用いて，有限体積法に基づく解法を利用することにより，質量保存則を高精度に満足する解法を示した．また，計算領域中に含まれる固体の影響を考慮するために，流速と温度の平均化操作を行う計算段階を考察し，数値的に安定な解法を示した．さらに，本研究では，圧縮性流体の圧力計算を陰的に行い，各基礎方程式の解法の手順を検討することによって，適切な手順で変数の更新と平均化操作が行われる計算手法を示した．この計算手法により，一般に多大な計算時間が必要となる低マッハ数圧縮性流れに対して，従来の解法よりも，音速に基づくクーラン数を大幅に大きく設定できる効率的な解法が提案された．</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	鳥 生 大 祐
<p>第3章では、第2章で提案された数値解析手法の有効性を確認している．計算手法の有効性の確認は、(1)固体との熱連成を伴う自然対流など低マッハ数流れにおける CFL 条件に関する検討、(2)理論解や既往の実験結果、また既往の計算結果を対象とした、本計算手法の妥当性に関する検討、(3)実用問題を想定した数値実験、の3段階に分けて行われた．各項目では、以下のような検討が行われている．</p> <p>最初に、上記(1)の検討では、熱伝導性を有する円形固体領域を含むキャビティ内の自然対流を対象として本計算手法の検討を行っている．すなわち、圧力計算に陰解法を利用し、各基礎方程式の計算手順に検討を加えた本数値解法によって、音速に基づく CFL 条件を緩和し、大きな時間刻み幅で高速に計算を行うことが可能であることを確認した．具体的には、音速に基づくクーラン数が約 700～1200 程度となるまで時間刻み幅を大きく設定して安定に計算を行えること、時間刻み幅を大きく設定することで定常解を得るまでの計算時間が従来よりも大幅に短縮されることを確認し、本計算手法の有効性を示した．また、計算領域内に含まれる固体領域の平均化操作を本研究で提案した手法で処理することによって、固体周りにおける温度の非物理的な振動を抑制することができ、妥当な解が得られることを確認している．</p> <p>次に、上記(2)の検討では、本研究の数値解析手法を理論解が存在するベンチマーク問題や既往の実験結果、また境界適合格子等を用いた既往の数値計算結果に適用した．その結果、まず提案した手法では密度の圧力依存性が適切に考慮され、くさび形の固体周りの衝撃波を理論解とほぼ同様に計算できることを示した．また、低温壁面の領域内に設置された高温固体周辺における低マッハ数の圧縮性流体の自然対流を妥当に計算できることを確認した．特に、高温固体と圧縮性流体の間に 100[K]という大きな初期温度差がある場合にも安定に計算が行えることを示している．さらに、固体に熱伝導性がある場合の自然対流現象と、固体内部の温度分布が適切に計算されることを示し、熱連成が適切に計算されることを確認した．なお、本計算手法では、全ての計算条件において質量保存則が高精度に満足される．</p> <p>最後に、上記(3)の検討では、実用的な工学問題を想定した数値実験を行い、本計算手法の適用可能性について考察を行っている．最初に、多数の高温円柱が計算領域内に含まれる場合の自然対流現象を、流体と固体の熱伝導率を広範に変化させて計算し、妥当な結果が得られることを確認した．次に、低温および断熱壁面から構成される密閉容器内に設置された発熱固体周辺に生ずる自然対流現象の計算を行った．そして、その計算結果を初期条件として、密閉容器の一部を開放し、容器内に生じた高圧・高温圧縮性流体が容器外部へ流出する過程の計算を行えることを示した．この計算で得られた結果は、既往の実験結果と同様の傾向を示すことも確認された．以上のように、流体の圧縮性と発熱固体の熱連成を考慮しなければ扱うことが困難な現象が、本計算手法により計算可能であることを示した．</p> <p>第4章は結論であり、第1章から第3章で得られた結果を総括的にとりまとめている．</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、圧縮性流体と固体の熱連成を考慮した多相場の数値解析手法の開発を目的とする研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

(1) 圧縮性流体と固体の熱連成を考慮した多相場解析手法の開発

提案された数値解析手法では、圧縮性流体と固体から構成される多相場を1つの混合流体としてモデル化し、平均化された多相場の基礎方程式に対して、圧縮性流体解法に基づく流体計算を行う。このため、本手法では相境界に境界条件を設定する必要がなく、単純な直交構造格子を利用して圧縮性流れと固体内部の熱伝導を統一的に計算できる。さらに、この解析手法の特徴として、(a)保存形式の移流方程式を解いて密度を更新することで質量保存則が高精度に満足されること、(b)圧力計算を陰的に行い、変数の更新を適切な手順で行うことで、低マッハ数圧縮性流れに対して音速に基づくCFL条件を、既往の解法より大きく設定した高速計算が可能なこと、などの点があげられる

(2) 数値解析手法の有効性

提案された数値解析手法の有効性を確認するために、(A)計算手順の妥当性に関する検証、(B)計算結果の妥当性に関する検証、(C)実用問題の数値実験が行われた。

(A)計算手順の妥当性に関する検証では、円形固体領域を含むキャビティ内の自然対流計算が行われた。その結果、提案された解析手法では、自然対流のように長時間の計算が必要となる低マッハ数流れについて、音速に基づくクーラン数を既往の解法より大きく設定した高速な計算が行えることが示された。(B)計算結果の妥当性に関する検証では、理論解が存在するベンチマーク問題や既往の実験、また境界適合格子を用いて行われた既往の数値計算への適用が行われた。その結果、提案された解析手法では、密度の圧力依存性が考慮されてくさび形の固体周りの高マッハ数流れを再現できること、熱伝導性固体や高温固体と圧縮性流体の共存場を妥当に計算できることが示された。また、本手法では質量保存則が高精度に満足されることも確認された。(C)実用問題を想定した数値実験では、円柱群内の自然対流と、発熱固体を含むキャビティ内の高圧・高温圧縮性流体のキャビティ外部への流出過程を計算し、実用問題へ本手法が適用可能であることが確認された。

以上のように、本論文では、圧縮性流体と固体の熱連成を考慮した多相場解析手法が新たに提案され、その有効性について幅広く検討していることから、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年8月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 平成27年12月24日以降